ИНЖЕНЕРНО-АГРОПРОМЫШЛЕННЫЕ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

УДК 631.354.62-530

В.В. РАДИН, М.С. ГНУТОВ, С.В. КУРУЧУК

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАЗГОНА ПРИВОДА РАБОЧИХ ОРГАНОВ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ЛЕНИКСНОЙ ПЕРЕДАЧИ

В данной статье получены уравнения движения привода рабочих органов комбайна при включении леникснoй передачи, которая в этот период проявляет свойства нелинейной неголономной связи второго порядка. Показано, что без существенных погрешностей для практики уравнение нелинейной неголономной связи можно линеаризовать и применить для построения аналитической модели разгона привода комбайна уравнения Ценова второго рода.

Ключевые слова: *динамика привода зернокомбайна, неголономная связь второго порядка, линеаризация, уравнения Ценова.*

Введение. В настоящее время актуальным вопросом при аналитическом исследовании динамики неголономных систем является составление уравнений движения системы на основе дифференциальных принципов *n*-го порядка. В связи с этим нам предстоит построить аналитическую модель, описывающую разгон рабочих органов зернокомбайна с помощью лениксной передачи.

Постановка задачи. Представим привод зернокомбайна в виде двухмассовой механической системы, схема которой изображена на рисунке.

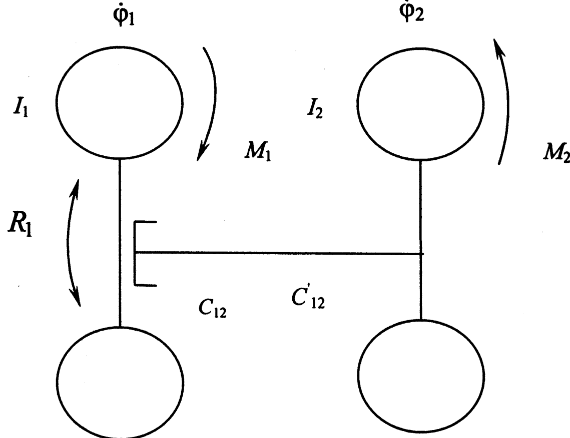


Схема двухмассовой механической системы привода зерноуборочного комбайна: I_1 – момент инерции движущихся масс двигателя, приведенных к коленвалу; I_2 – момент инерции рабочих органов комбайна, приведенных к валу главного контрпривода; M_1, M_2 – крутящие моменты соответственно на валах двигателя и главного контрпривода; $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$ – угловые скорости соответствующих валов; R_1 – обобщенный реактивный крутящий момент на лениксной передаче в момент включения привода рабочих органов; C_{12}, C'_{12} – соответственно приведенные крутильные жесткости лениксной передачи и валов двигателя и главного контрпривода

Используем для вывода уравнений динамики рассматриваемой системы известные уравнения второго рода Ценова [1,2]

$$\frac{\partial R}{\partial \ddot{q}_\mu} + \sum_{h=p+1}^{n} \frac{\partial R}{\partial \ddot{q}_h} в_{h_\mu} = 0, \tag{1}$$

где R – вторая функция Ценова; $в_{h_\mu}$ – соотношение Аппеля для обобщенных ускорений системы; $\ddot{q}_\mu$ – независимое угловое ускорение вала двигателя; $\ddot{q}_h$ – зависимое угловое ускорение вала контрпривода главного; p – число независимых координат системы.

Воспользуемся соотношением

$$R = P - \sum_{i=1}^{n} Q_i \ddot{q}_i, \tag{2}$$

$$i = \overline{1,n}, \qquad n = 2,$$

здесь P – первая функция Ценова; Q_i – обобщенные силы:

$$P = \frac{1}{2} \ddot{T} - 3 \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial T}{\partial q_i} \ddot{q}_i \quad . \tag{3}$$

$$в_{h\mu} = \frac{\partial \ddot{q}_h}{\partial \ddot{q}_\mu}. \tag{4}$$

Методика построения аналитической модели. Обобщенные силы Q_i, как и в уравнениях Лагранжа, находим как коэффициенты при соответствующих вариациях обобщенных координат в выражениях виртуальной работы системы

$$\delta A = \delta A_д - \delta A_c,$$

где $\delta A_д$ – элементарная работа движущих сил; δA_c – элементарная работа сил сопротивления.

Таким образом,

$$\delta A = M_1 \delta\varphi_1 - M_2 \delta\varphi_2 \text{ и } Q_1 = M_1, \qquad Q_2 = -M_2.$$

Кинетическая энергия T в выражении (3) определяется как сумма кинетических энергий сосредоточенных масс рассматриваемой механической системы

$$T = \sum_{i=1}^{n} T_i = \frac{1}{2}\left(I_1 \dot{\varphi}_1^2 + I_2 \dot{\varphi}_2^2 \right). \tag{5}$$

Первая и вторая производные по времени от кинетической энергии системы имеют вид:

$$\dot{T} = I_1 \dot{\varphi}_1 \ddot{\varphi}_1 + I_2 \dot{\varphi}_2 \ddot{\varphi}_2; \tag{6}$$

$$\ddot{T} = I_1 \left(\ddot{\varphi}_1^2 + \dot{\varphi}_1 \dddot{\varphi}_1 \right) + I_2 \left(\ddot{\varphi}_2^2 + \dot{\varphi}_2 \dddot{\varphi}_2 \right). \tag{7}$$

Частные производные от кинетической энергии по обобщенным координатам при допущении, что система состоит только из роторных масс, моменты инерции которых не зависят от положения системы, равны нулю, т.е.

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = 0 .$$

Потому в соответствии с выражением (3) получим:

$$P = \frac{1}{2}\left[I_1\left(\ddot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_1\dddot{\varphi}_1\right) + I_2\left(\ddot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_2\dddot{\varphi}_2\right)\right] - M_1\ddot{\varphi}_1 + M_2\ddot{\varphi}_2 .$$

Дифференцируя вторую функцию Ценова по обобщенным ускорениям, получаем:

$$\frac{\partial R}{\partial \ddot{\varphi}_1} = I_1\ddot{\varphi}_1 - M_1; \qquad \frac{\partial R}{\partial \ddot{\varphi}_2} = I_2\ddot{\varphi}_2 + M_2 .$$

Уравнение нелинейной неголономной связи второго порядка, описывающее реальные свойства лениксной передачи комбайна, полученное в работе [4], имеет вид:

$$f_p = \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1\left[\frac{K_1(t)\ddot{\varphi}_1}{\dot{\varphi}_{1xx} - K_2(t)\ddot{\varphi}_1 i_0}\right] = 0, \tag{8}$$

где $K_1(t)$, $K_2(t)$ – некоторые коэффициенты, зависящие от параметров лениксной передачи и темпа ее включения; i_0 – исходное передаточное отношение лениксной передачи; $\dot{\varphi}_{1xx}$ – угловая скорость двигателя в режиме холостого хода.

Линеаризуем уравнение (8) относительно обобщенных ускорений. Ограничимся лишь двумя первыми членами разложения нелинейных функций в ряды Тейлора [3]. В результате получим линейное относительно ускорений координат уравнение связи:

$$f_p = \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1\left\{a_0 + \left[a_{1\varphi}\left(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_{10}\right) + a_{1k1}\left(K_1(t) - K_{10}\right) + a_{1k2}\left(K_2(t) - K_2\right)\right]\right\} = 0,$$

где
$$a_0 = \frac{K_{10}\ddot{\varphi}_{10}}{\left(\dot{\varphi}_1 - K_{20}\ddot{\varphi}_{10}\right)i_0}; \qquad a_{1\varphi} = \frac{\dot{\varphi}_1 K_{10}}{i_0\left(\dot{\varphi}_1 - K_{20}\ddot{\varphi}_{10}\right)};$$

$$a_{1л_1} = \frac{\ddot{\varphi}_{10}}{\left(\dot{\varphi}_1 - K_{20}\ddot{\varphi}_{10}\right)i_0}; \qquad a_{1л_2} = \frac{K_{10}\ddot{\varphi}_{10}^2}{i_0\left(\dot{\varphi}_1 - K_{20}\ddot{\varphi}_{10}\right)^2}. \tag{9}$$

Определяем далее соотношение Аппеля для обобщенных ускорений. Продифференцируем уравнение связи (8) по времени:

$$\ddot{\varphi}_2 = \ddot{\varphi}_1\left\{a_0 + \left[a_{1\varphi}\left(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_{10}\right) + a_{1\kappa1}\left(K_1(t) - K_{10}\right) + a_{1k2}\left(K_2(t) - K_{20}\right)\right]\right\} +$$

$$+ \dot{\varphi}_1\left[a_{1\varphi}\dddot{\varphi}_1 + a_{1k1}\dot{K}_1(t) + a_{1k2}\dot{K}_2(t)\right] . \tag{10}$$

Для двухмассовой системы (см.рисунок) при $h = 1$, $\mu = 1$ соотношение Аппеля будет иметь следующий вид:

$$в_{hц} = в_{11} = \frac{\partial \ddot{\varphi}_2}{\partial \ddot{\varphi}_1} = a_0 + \left(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_{10}\right) a_{1\varphi} + a_{1k1}\left(K_1(t) - K_{10}\right) + $$
$$+ a_{1k2}\left(K_2(t) - K_{20}\right) + a_{1\varphi}\ddot{\varphi}_1. \qquad (11)$$

В свернутой форме соотношение Аппеля имеет вид:

$$в_{11} = A(t) + 2a_{1\varphi}\ddot{\varphi}_1, \qquad (12)$$

где $A(t) = a_0 - a_{1\varphi}\ddot{\varphi}_{10} + a_{1k1}\left(K_1(t) - K_{10}\right) + a_{1k2}\left(K_2(t) - K_{20}\right).$ (13)

После подстановки всех полученных компонентов в уравнение (1) и соответствующих преобразований получим дифференциальное уравнение, описывающее разгон рабочих органов комбайна с помощью лениксной передачи.

$$I_1\ddot{\varphi}_1 - M_1 + \left(I_2\ddot{\varphi}_2 + M_2\right)\left(A(t) + 2a_{1\varphi}\ddot{\varphi}_1\right) = 0. \qquad (14)$$

Пренебрегая резкостью включения лениксной передачи, сопротивлениями рабочих органов M_2 при разгоне, а также произведя элементарные преобразования, получаем следующую систему дифуравнений для исследования процесса разгона привода комбайна с помощью клиноременной передачи с лениксным включением

$$I_2\ \ddot{\varphi}_1^2 + \ddot{\varphi}_1\left(A(t) + I_1 B(t)\right) \dots \left(M_1 - A(t)\right) a - 2_{1\varphi}\ddot{\varphi}_1, = 0$$
$$\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1\left\{a_0 + a_{1\varphi}\ a_{1\varphi}\left(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_1\right) + a_{1k1}\left(K_1(t) - K_{10}\right) + a_{1k2}\left(K_2(t) + K_{20}\right)\right\} = 0 \qquad .(15)$$

Выводы.

1. Анализ системы уравнений (15) показывает, что она содержит нелинейные относительно ускорения члены и не может быть использована для определения обобщенных реакций R_1 на лениксной передаче в момент её включения.

2. Использование нелинейного дифуравнения связи второго порядка требует введения новых определений обобщенных вариаций координат, исключающих выводы, выходящие за механику Ньютона.

3. Проведенные расчеты динамических нагрузок в приводе зерноуборочного комбайна ДОН-1500 с помощью системы уравнений (15) позволили установить, что при темпе включения, превышающем 10с, в лениксной передаче резко возрастают динамические нагрузки, обусловленные третьей производной обобщенных координат по времени.

Библиографический список

1. Добронравов В.В. Основы аналитической механики /В.В. Добронравов. – М.: Высшая школа, 1976. – 325 с.
2. Добронравов В.В. Основы механики неголономных систем /В.В.Добронравов. – М.: Высшая школа, 1970. – 285 с.

3. Корн Г. Справочник по математике /Г.Корн, Т.Корн. – М.: Наука, 1978. – 831 с.
4. Радин В.В. Динамика и оптимизация процессов в приводах зерноуборочных комбайнов: дис…. д-ра техн. наук / РИСХМ. – Ростов н/Д, 1990. – 382 с.

Материал поступил в редакцию 27.10.08.

V.V. RADINA, M.S.GNUTOVA, S.V.KURUCHUK'S PAPERS.

ANALYTICAL MODEL OF PROCESS OF ACCELERATION OF A DRIVE OF END-EFFECTORS OF THE GRAIN COMBINE AT TURNING ON LENIX-TRANSMISSIONS

In the given paper equations of motion of a drive of end-effectors of a combine are gained at turning on lenix-transmissions which in this phase exhibits properties of a nonlinear nonholonomic constraint of the second order. It is displayed, that without essential lapses for practice the equation of a nonlinear nonholonomic constraint can be linearized and applied to build-up of analytical model of acceleration of a drive of a combine of equation Tsenov of the second stem.

РАДИН Виктор Викторович (р.1939), заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины» Ростовской-на-Дону государственной академии сельхозмашиностроения, доктор технических наук (1991), профессор (1992). Окончил (1962) Ростовский-на-Дону институт сельхозмашиностроения.
Научные интересы: динамика приводов сложных сельскохозяйственных машин.
Имеет 125 научных публикаций.

ГНУТОВ Максим Сергеевич (р.1981), аспирант РГАСХМ. Окончил Ростовскую-на-Дону государственную академию сельскохозяйственного машиностроения (2003).
Научные интересы: динамика привода зерноуборочных машин.
Имеет 3 публикации.

КУРУЧУК Сергей Владимирович (р.1982), соискатель РГАСХМ. Окончил Ростовскую-на-Дону государственную академию сельскохозяйственного машиностроения (2004).
Научные интересы: динамика привода зерноуборочных машин.
Имеет 4 публикации.